

УДК 620.193

**О ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УВЛАЖНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА
В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ**

*канд. техн. наук Л.С. ЛИС, канд. техн. наук Т.Я. ЦАРЮК, Ю.В. МЕДВЕДЕВА
(Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси, Минск)*

Представлен расчет продолжительности увлажнения металлических поверхностей в атмосферных условиях для четырех регионов Беларуси, выбранных для натурных испытаний с учетом показателей климатических условий. Показаны особенности изменения этого параметра для исследуемых объектов, что позволяет прогнозировать степень развития коррозии металлов. Проанализированы все условия, обеспечивающие появление влаги на поверхности металла для расчета общего времени увлажнения. Полученные данные свидетельствуют, что в суммарной продолжительности увлажнения металлических поверхностей максимальный вклад принадлежит времени высыхания пленок влаги. Для полного анализа особенностей развития процессов коррозии для исследуемых территориальных объектов необходимо учесть специфику загрязнения атмосферы коррозионно-опасными ингредиентами.

Проблемы борьбы с коррозией в последнее время приобретают все большее значение. Это обусловлено увеличивающимися экономическими потерями техники и технологического оборудования от коррозии, а также резко возрастающими требованиями технического прогресса к безопасности во всем мире. Мировая статистика свидетельствует, что в ряде передовых стран на возмещение потерь металла от коррозии расходуется до 40 % ежегодно выплавляемой стали [1].

Самым распространенным и значимым видом разрушения металлических изделий является атмосферная коррозия, поскольку большинство металлических конструкций и сооружений, а также транспортной и иной техники эксплуатируется в атмосферных условиях.

Определяющими факторами развития процессов коррозии на металле являются климатические условия хранения и эксплуатации техники, а также агрессивность рабочей среды. Из климатических факторов наиболее значимыми являются влажность и температура воздуха, солнечная радиация, частота атмосферных осадков и их минерализация, периодичность туманов. Важную, а порой и определяющую роль в этих процессах играет степень загрязнения и состав загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Благодаря растворимости имеющихся солей, кислот и коррозионно-агрессивных газов в пленках влаги, поступающей в виде осадков и конденсирующейся на поверхности металла из атмосферы, создаются благоприятные условия для развития электрохимических процессов коррозии. В этой связи важным параметром данного процесса будет установление истинного времени увлажнения металлической поверхности.

Основная часть. Продолжительность увлажнения любой поверхности в атмосферных условиях состоит из времени выпадения осадков (дождя, мокрого снега), времени конденсации влаги вследствие выпадения росы и тумана, времени высыхания появившейся пленки влаги. Следует отметить, что интенсивность процесса коррозии для отмеченных отрезков времени будет различна. Так, во время дождя на поверхности металла появляется непрерывно возобновляющаяся пленка влаги, что обеспечивает определенный характер процесса и постоянство скорости коррозии [2]. При конденсации влаги на поверхности электрохимический процесс протекает под тонкими пленками влаги, обеспечивающими иной характер протекания электродных явлений. При высыхании пленки влаги создаются условия уменьшения ее величины во времени, что приводит к изменению как характера, так и скорости коррозионного процесса. При этом и время конденсации влаги, и время высыхания пленки зависит от метеорологических параметров: влажности воздуха, температуры воды и металла.

Для изучения закономерностей развития и протекания процессов коррозии, нами обоснован и произведен выбор территориальных регионов, различающихся в первую очередь по особенностям загрязнения атмосферного воздуха на территории Республики Беларусь с учетом различий метеорологических условий. В результате анализа отмеченных параметров и с учетом творческого научного сотрудничества с имеющимися территориальными научно-практическими организациями для исследований были выбраны следующие территориальные регионы:

- Минская агломерация – место расположения организации исполнителей исследований;
- Солигорский промышленный район, отличающийся спецификой загрязнения атмосферы хлорными соединениями. Данные по метеопараметрам используются по Слуцкой метеостанции;
- Новополоцкая промышленная зона, характеризуемая выбросами нефтепереработки, и в первую очередь сернистыми соединениями.

В качестве фонового региона для сравнения полученных результатов исследований был выбран лесной массив в 30 км от г. Минска, который нами отождествляется с некоторой вероятностью с Березинским биосферным заповедником, расположенным также в северо-восточном направлении.

Для решения поставленной задачи нами проанализированы имеющиеся методические подходы, изложенные в литературных источниках. В Институте физической химии АН СССР [3, 4] была предложена методика по расчету продолжительности смачивания металла ($\tau_{\text{общ.}}$) по метеорологическим характеристикам местности:

$$\tau_{\text{общ.}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \quad (1)$$

где τ_1 – время выпадения осадков (дождя, мокрого снега); τ_2 – время конденсации влаги вследствие выпадения росы и тумана; τ_3 – время высыхания появившейся пленки влаги.

Первые две составляющие регистрируются приборами; третья является сложной функцией нескольких переменных: толщины пленки влаги, скорости испарения воды, числа случаев смачивания, радиационного баланса, скорости ветра. В [4] предложена формула для расчета скорости испарения влаги с гладкой поверхности металла, основанная на линейных зависимостях этого параметра от температуры и влажности воздуха:

$$V = 35,5 - 0,38w + 0,85t, \quad (2)$$

где V – скорость испарения влаги с гладкой поверхности металла, мкм/ч; w – влажность воздуха, %; t – температура воздуха, °C.

Считаем, что предложенную формулу следует дополнить составляющей от влияния скорости ветра. Основываясь на классических работах по испарению в естественных условиях, И.М. Будыко предложена линейная зависимость скорости испарения влаги от скорости ветра [6]. В этом случае формула (2) примет вид:

$$V = 35,5 - 0,38w + 0,85t + k \cdot b, \quad (3)$$

где b – скорость ветра (м/с); $k = 0,7$ – коэффициент пропорциональности для гладкой поверхности по рекомендациям [6].

Время высыхания поверхности металла (τ_3) определяется по формуле:

$$\tau_3 = \frac{\delta}{V} \cdot n, \quad (4)$$

где δ – толщина пленки влаги, мкм; n – число случаев смачивания; V – рассчитанная по (3) скорость испарения воды.

Толщина пленки влаги на металлической поверхности определяется источником увлажнения. При выпадении дождя на поверхности существует видимая возобновляющаяся пленка воды, которая характеризуется интенсивным перемешиванием и смыванием продуктов коррозии. При конденсации влаги (воздействие тумана и росы) следует рассматривать процесс под тонкими невидимыми пленками электролита, что характеризуется своей спецификой кинетики электрохимического процесса, более явно связанной с метеорологическими условиями. И, наконец, в период высыхания слоя влаги на поверхности металла электрохимический процесс коррозии протекает при уменьшающейся толщине пленки электролита, что обуславливает в некотором периоде возрастание благоприятности роста скорости коррозии, и в дальнейшем ее затухание. В этом случае параметры процесса также в значительной степени зависят от температуры и влажности воздуха. Как установлено лабораторными исследованиями [3], толщину пленки влаги при расчетах условно принимают в пределах 80 – 100 мкм, хотя этот вопрос требует более детальных исследований.

Рассмотрим составляющие продолжительности увлажнения поверхности металла от различных источников увлажнения.

Для определения продолжительности увлажнения осадками используются данные по количеству дней с дождем и интенсивности дождя (информация Белгидромета). В этом случае можно воспользоваться имеющимися данными по взаимосвязи интенсивности дождя со временем его выпадения для региона юг Подмосковья [7], которая может быть выражена полученными нами уравнениями регрессии:

$$\text{– для } I \leq 60 \text{ мм} \quad t_0 = 1,5I - 30 \text{ (мин);}$$

$$\text{– для } I > 60 \text{ мм} \quad t_0 = 3I - 120 \text{ (мин),}$$

где I – интенсивность дождя; t_0 – время выпадения дождя.

Для получения более достоверных результатов расчет для исследуемых объектов выполнен по месячным данным. Продолжительность увлажнения металлических поверхностей за счет выпадения росы определено по установлению суточных условий ее появления. Для чего рассмотрен суточный ход изменения температуры и влажности воздуха для летнего и весеннего периодов времени года по каждому из

исследуемых территориальных объектов. Такие графики для Новополоцкого промышленного района приведены на рисунке 1.

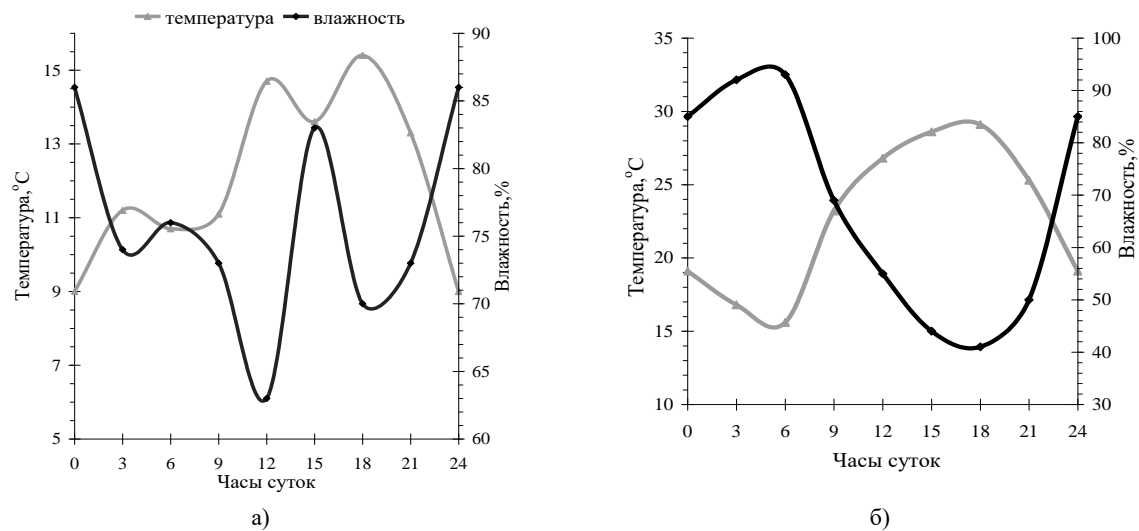


Рис. 1. Ход суточной температуры и влажности воздуха в г. Полоцке:
а – весна (15.04.06); б – лето (15.07.06)

Если для лета суточный ход указанных метеорологических показателей характеризуется достаточно плавными изменениями с характерными одним минимумом и одним максимумом, то для весеннего периода наблюдается значительная вариабельность значений с тремя согласованными между собой минимумами и максимумами. На основании этих данных построены графики суточного перепада температур для 3-х часового интервала (кривые), на которые наложены для этих же периодов значения температурных перепадов, вызывающих конденсацию влаги (росы) (рис. 2). Последние получены на основании разности между текущей температурой и точкой росы, определяемой согласно [2] по значениям температуры и влажности воздуха. Условиями выпадения росы являются превышение значений перепада температур над точкой росы. На рисунке 2 эти области заштрихованы, что позволяет сделать однозначную количественную оценку: летом вероятное время выпадения росы составляет 3 ч в утреннее время и столько же в вечернее, т.е. всего 6 ч; весной время выпадения росы несколько меньше за счет сокращения вероятного времени в утренние часы, итоговое время составляет в сутки 5 ч.

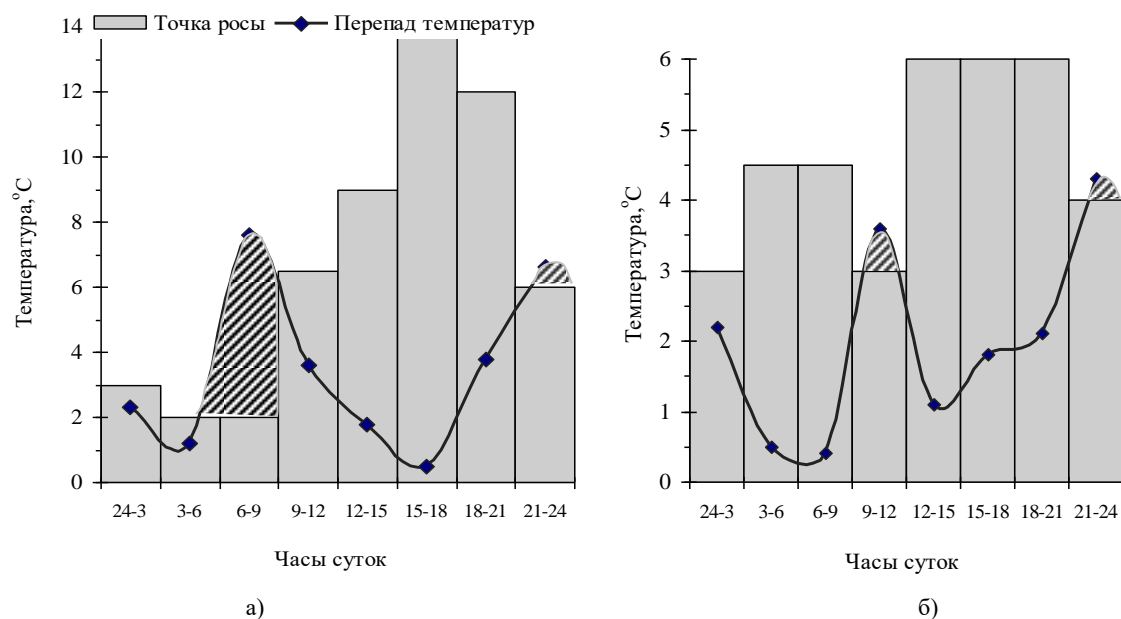


Рис. 2. Совмещенные диаграммы определения условий появления росы в г. Полоцке:
а – лето (15.07.06); б – весна (15.04.06)

Такие подходы были заложены в расчет времени увлажнения поверхности металлических изделий в исследуемых регионах с учетом количества дней с росой. Для определения продолжительности увлажнения металлических поверхностей от действия туманов нами использованы долговременные статистические данные по продолжительности туманов для Минска, которые с достаточной вероятностью могут быть использованы и для других объектов Республики Беларусь [8]. Для приближения полученных результатов к реальным условиям исследуемых объектов к 2006 году нами рассчитаны ежемесячные отклонения значений количества дней с туманами для каждого объекта от приведенных статистических показателей. Для этого рассчитывался коэффициент отклонения реальных данных по объектам от используемых статистических показателей:

$$k = \frac{n_p}{n_{cm}}, \quad (5)$$

где n_p – ежемесячное количество дней с туманами для исследуемых объектов; n_{cm} – имеющиеся статистические данные по продолжительности туманов для г. Минска.

На основании приведенного выше коэффициента k произведен расчет времени появления влаги при наличии туманов с учетом имеющейся для исследуемых объектов информации по дням с туманами.

В отношении зимнего периода в литературе имеются несогласующиеся подходы. Предлагается учитывать только дни с мокрым снегом и температурой оттаивания льда и снега ($t = -1^\circ\text{C}$) [4], в другом случае производится учет дней с температурой от -5 до -1°C [3].

Для периода (I кв.), где среднемесячные температуры были отрицательны, применение приведенной выше формулы (3) не дает приемлемых результатов. В этой связи мы воспользовались рекомендациями, полученными при натурных испытаниях [3]. Установлено, что значимая коррозия металла происходит при выпадении в зимние месяцы мокрого снега или дождя, а также в периоды оттаивания снега или льда при повышении температуры воздуха более чем -1°C . Кроме того, оттаивание снега или льда на испытываемых пластинах возможно при наличии разности температур между воздухом и пластиной, нагреваемой в зимне-весенний период солнцем, что также способствует коррозии металла, однако данный фактор может быть учтен только в натурных исследованиях. Кроме того, известно, что при отрицательных температурах на поверхности раздела фаз «лед – твердая подложка» всегда существует прослойка незамерзшей воды [8, 9]. Например, в случае кварцевых капилляров, что можно идентифицировать с металлической поверхностью в нашем случае, такая прослойка существует вплоть до температур минус 3 – минус 5 $^\circ\text{C}$ и имеет толщину от нескольких ангстрем до 150 – 200 Å. При этом существенное значение в процессах развития коррозии, когда можно считать воздействие такой прослойки как электролита, по мнению Н.Д. Томашова [5], будет иметь пленка толщиной более 100 Å. Такое значение толщины незамерзшей пленки прогнозируется при температурах выше, чем минус 2 $^\circ\text{C}$ [9], что и было принято за исходное значение в расчетах. Указанные температурные условия обеспечивались на всех объектах только в марте в течение 10 – 20 дней, при этом для объекта (г. Солигорск) это наблюдалось на протяжении 6 часов, для остальных объектов 3 – 4 часа. В этой связи в расчетах времени увлажнения испытываемых пластинок в I квартале нами условно принято 60 часов.

Таким образом, проанализированы все условия, обеспечивающие появление влаги на испытываемых пластинках для расчета общего времени увлажнения (табл. 1).

Расчет скорости высыхания влаги выполнен по формуле (3) для II, III и IV кварталов года. При этом толщина пленки влаги при всех вариантах ее появления принята условно 80 мкм [4]. Для рассматриваемых условий существования незамерзшей пленки влаги нами использованы следующие подходы.

Если принять гипотетически, что скорость высыхания незамерзающей пленки влаги определяется миграционным потоком влаги из талой зоны в мерзлую, то согласно данным [11] плотность миграционного потока составляет порядка $2 \cdot 10^7$ кг/м²·с. Преобразование входящих единиц в этой величине с учетом площади испытываемой пластинки обеспечит скорость удаления влаги 1,8 мкм/ч. Этот параметр рассчитан для сравнительной оценки с таковым при использовании формулы (3), однако, считая, что миграционный поток может реализовываться при сохранении условий разницы температур талой и мерзлой зон постоянно, примем вероятность реализации этих условий в 50 %. В таком случае время ухода влаги с испытываемых пластинок может быть определено: $60 \text{ ч} \cdot 0,5 = 30 \text{ ч}$, что нами учтено в общей продолжительности увлажнения.

Таким образом, в таблице 1 представлены исходные данные и полученные результаты расчета важнейшего параметра развития коррозии металлических изделий – продолжительности увлажнения их поверхности для исследуемых территориальных регионов.

Установлено, что максимальная скорость высыхания влаги на металле, приходящаяся на весенне-летние месяцы, составляет 15 – 20 мкм/ч, минимальная 3 – 4 мкм/ч; в условиях нахождения на пластинках льда (снега) этот показатель снижается до 1,8 мкм/ч.

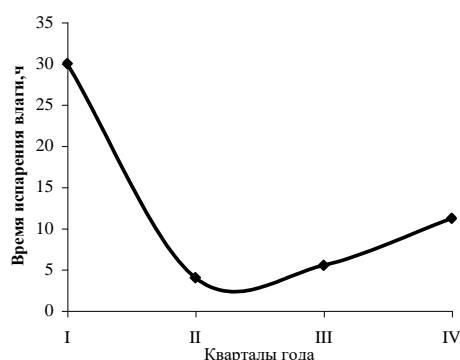


Рис. 3. Годовой ход времени испарения влаги с испытываемых пластинок

На рисунке 3 представлен годовой ход времени высыхания пленки влаги.

Годовой ход изменения продолжительности увлажнения металлических поверхностей по всем исследуемым объектам обнаруживает линейный характер нарастания, что может быть представлено уравнением (6):

$$\tau_3 = ax - b, \quad (6)$$

где x — количество дней, начиная с января; a и b — коэффициенты, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов a и b уравнения (6)

Территориальные объекты исследований	Коэффициенты	
	a	b
Новополоцкая промышленная зона	170	350
Минская агломерация	140	120
Случкая зона (Солигорский горнопромышленный район)	200	240
Березинский биосферный заповедник	150	250

Выводы. Установлено, что по продолжительности увлажнения металла исследуемые территории различаются существенно, коэффициент вариации порядка 40 %, хотя различия по температуре и влажности воздуха на этих объектах составляют 3 – 4 %. Полученные данные свидетельствуют, что в суммарной продолжительности увлажнения металлических поверхностей максимальный вклад принадлежит времени высыхания пленок влаги. Так, в весенне-летние месяцы этот вклад для исследуемых объектов составил 40 – 50 %, а в осенне-зимние увеличился до 70 – 80 %. Такое возрастание обусловлено увеличивающимся количеством циклов увлажнения и последующего высыхания за счет выпадения осадков и конденсации влаги. Максимальное значение продолжительности увлажнения поверхностей отмечено для Солигорского горнопромышленного района (см. табл. 1). Предварительные данные по оценке коррозии металлических пластин за 3-х месячный период показали, что максимальное значение потери их массы также отмечено для этого объекта, что свидетельствует о существенном влиянии на процесс коррозии металла этого обобщенного показателя метеорологических условий. Однако для полного анализа особенностей развития процессов коррозии для исследуемых территориальных объектов необходимо учесть специфику загрязнения атмосферы коррозионно-опасными ингредиентами, что будет реализовано после получения результатов дальнейших натурных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, Е.С. Ингибиторы коррозии металлов / Е.С. Иванов, С.С. Иванов. — М.: Знание, 1980. — 64 с.
2. Розенфельд, И.Л. Атмосферная коррозия / И.Л. Розенфельд. — М.: Изд. АН СССР, 1960. — 372 с.
3. Беруштитис, Г.К. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях / Г.К. Беруштитис, Г.Б. Кларк. — М.: Наука, 1971. — 156 с.
4. Голубев, А.И. Расчет увлажнения и коррозии металлов в атмосферных условиях / А.И. Голубев, М.Х. Кадыров // Труды III Междунар. конгр. по коррозии металлов. — М.: Мир, 1963. — Т. IV. — С. 531 – 540.
5. Томашов Н.Д., Беруштитис Г.К. // Тр. ИФХ АН СССР. Вып. VI. — 1958. — С. 106 – 117.
6. Будыко, М.И. Испарение в естественных условиях / М.И. Будыко. — Л.: ГМИ, 1948.
7. Борисов, А.А. Климатография Советского Союза / А.А. Борисов. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1970. — 311 с.
8. Облака и облачная атмосфера: справочник / под ред. И.П. Мазиной, А.Х. Хргиана. — Л.: ГМИ, 1989. — 647 с.
9. Чистотин, Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах / Л.В. Чистотин. — М.: Наука, 1973.
10. Бровка, Г.П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г.П. Бровка. — Минск: Навука і тэхніка, 1991. — 191 с.
11. Дедюля, И.В. Явления переноса и свойства незамерзающих прослоек воды в торфе, сапропелях и модельных капиллярно-пористых телах: дис. ... канд. техн. наук / И.В. Дедюля. — Минск, 1990. — 129 с.

Поступила 19.12.2007